

# Paravalanches sur deux pentes instables dans le pergélisol valaisan

Par Marcia Phillips<sup>1</sup>

Bull. Murithienne 120: 19-24

## ZUSAMMENFASSUNG

### Lawinenverbauungen auf instabilen Permafrosthängen im Wallis

Im Wallis befinden sich mehrere Anrissgebiete mit Lawinenverbauungen im Permafrost. Das Eidgenössische Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) führt seit 1996 ein Forschungsprojekt durch, um zu erforschen, welche Lawinenverbauungs- und Verankerungstypen in labilen, gefrorenen Permafrosthängen am besten geeignet sind. Die Messungen werden am Mont Dolin (Arolla) und auf Wisse Schijen (Randa) durchgeführt. An beiden Standorten befinden sich Schneesetze mit verschiedenen Verankerungstypen und Bohrlöcher. Die eingesetzten Methoden erlauben es, Deformationen und Temperaturen im Boden zu messen, sowie die Stabilität der Lawinenverbauungen zu beobachten. Die Kriechraten der Schneesetze sind relativ hoch, aber da die Bewegungen homogen sind, konnten bis jetzt keine Schäden beobachtet werden. Obwohl die Permafrosttemperatur nahe bei 0°C liegt, hätte ein Schmelzen des Permafrosts keine gravierenden Konsequenzen für die Hangstabilität, da der Eisgehalt im Schutt relativ gering ist.

## RÉSUMÉ

### Paravalanches sur deux pentes instables dans le pergélisol valaisan

En Valais plusieurs sites de paravalanches sont situés dans des zones à pergélisol. L'Institut fédéral pour l'Étude de la Neige et des Avalanches (ENA) mène un projet d'étude depuis 1996 dont le but est de déterminer les types de paravalanches et de systèmes d'ancrage les mieux adaptés aux conditions instables régnant dans des pentes raides gelées. Des mesures sont effectuées sur deux sites, le Mont Dolin (Arolla) et Wisse Schijen (Randa), qui sont équipés de filets à neige avec plusieurs types d'ancrage et de forages. Les méthodes utilisées permettent de mesurer les déformations du sol, les températures régnant dans le pergélisol et la stabilité des paravalanches. Sur les deux sites, les paravalanches manifestent des degrés de reptation plutôt élevés, mais grâce à l'homogénéité des déplacements, aucun dégât n'a été observé jusqu'à présent. La température du pergélisol est proche de 0°C sur les deux sites, mais vu la faible teneur en glace des éboulis, une fonte totale du pergélisol n'aurait pas de conséquences graves pour la stabilité du terrain.

Mots clés : pergélisol, paravalanches, ancrages, stabilité de pente

Permafrost, Lawinenverbauungen, Verankerungen, Hangstabilität



<sup>1</sup> Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (ENA), Davos, phillips@slf.ch

## INTRODUCTION

Le pergélisol est un phénomène très répandu dans les Alpes, le sol y est gelé en permanence au-dessus d'environ 2300 m, là où le terrain n'est pas recouvert par les glaciers. Par endroit, le pergélisol est facilement reconnaissable grâce à une haute teneur en glace, par exemple sous la forme de glaciers rocheux, un mélange de glace et de matériaux rocheux, fluant lentement vers l'aval (**fig. 1**). Ailleurs, il est plus difficile à reconnaître, car il y a peu ou pas de glace dans le sol – par exemple dans les éboulis raides ou dans la roche en place.

Le pergélisol est un phénomène thermique : le sol y est gelé en permanence pendant toute l'année, à l'exception de quelques décimètres à mètres proches de la surface, qui dégèlent en été, le «niveau actif». Plusieurs aspects du pergélisol sont dignes d'intérêt – il peut par exemple être utilisé comme indicateur climatique et il constitue souvent une réserve importante en eau (les glaciers rocheux sont riches en glace) mais peut aussi représenter un danger naturel ou poser des problèmes techniques en haute montagne. Là où le sol est gelé en permanence il peut être difficile, voir impossible de mettre en place des constructions tels que des mâts de remontées mécaniques, des cabanes de montagne ou ouvrages de protection contre les avalanches. Si la teneur en glace du sol est élevée, il est difficile d'y creuser et d'y installer des fondations ou des ancrages (STOFFEL, 1995; BROCCARD 1998). Lorsqu'il y a des déformations de pente dues au fluage de sédiments gelés au-dessus de la roche en place, les structures s'y trouvant peuvent subir des dégâts importants et coûteux.

En Valais, il y a plusieurs sites où les paravalanches sont construits dans du pergélisol, aux alentours de 3000 m (STOFFEL 1995, CRITTIN 1999). Deux de ces sites, Wisse Schijen (Randa) et Mont Dolin (Arolla) font l'objet d'une étude de l'ENA depuis 1996. Le but du projet est de déterminer les types de paravalanches et de systèmes d'ancrage les mieux adaptés aux conditions instables régnant dans les pentes raides gelées, ainsi que d'observer les effets de ces structures sur la stabilité et la température de ces pentes. Puisque les paravalanches modifient la distribution spatiale et temporelle de la couverture neigeuse sur les pentes raides, il n'a jusqu'à présent pas été clair si ils engendrent des changements du régime thermique du sol.

Les paravalanches doivent si possible être ancrés dans la roche en place dans les zones à pergélisol. Souvent les



FIGURE 1 – **Glacier rocheux du Milon** (au N de la Pointe d'Ar Piteta, 617800/107600). – PHOTO S. MARGRETH, ENA

ancrages doivent traverser une couche épaisse de sédiments meubles (par ex. des éboulis ou des sédiments glaciaires) avant d'atteindre celle-ci. Une partie de la couche supérieure de sédiments correspond généralement au niveau actif du pergélisol, ayant une épaisseur de quelques décimètres à quelques mètres, qui se dégèle au cours de l'été et qui peut contenir un mélange potentiellement instable de sédiments, de glace, d'eau liquide, et d'air. Si cette couche supérieure du sol flue trop rapidement, il est généralement indiqué de construire d'autres moyens de protection contre les avalanches, tels que des barrages de rétention ou de déflexion d'avalanches (OFEFP/FNP (1990/2000).

Les événements de l'hiver catastrophique 1998-1999 ont souligné l'importance des paravalanches dans les

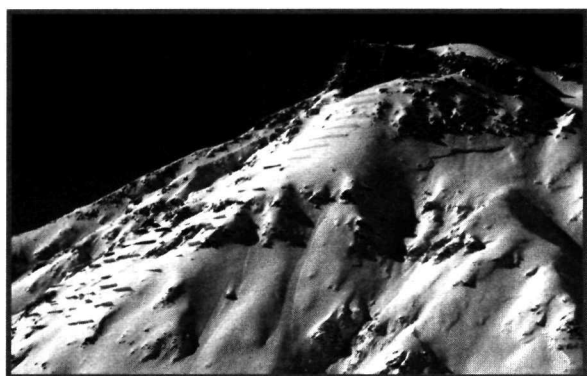


FIGURE 2 – Paravalanches de Wisse Schijen, Randa en février 1999 (à droite). L'effet de rétention des paravalanches est bien visible: une grande plaque de neige s'est détachée là où il n'y a pas de paravalanches.  
– PHOTO S. MARGRETH, ENA

régions alpines (*Der Lawinenwinter* 1999) publié par l'ENA en 2000 (fig. 2). Ces structures ressemblant à de grandes clôtures en acier ont retenu plusieurs mètres de neige au-dessus des villages et des voies de transport menacés. Sans leur effet de rétention dans les zones de déclenchement, les dégâts meurtriers causés par les avalanches auraient été beaucoup plus élevés. Environ 500 km de paravalanches ont été construits en Suisse depuis l'hiver catastrophique de 1951 et ont empêché environ 350 avalanches potentiellement destructives en 1999 (MARGRETH & al. 2000). En 1951, 98 personnes ont perdu la vie, tandis qu'en 1999 le bilan fut beaucoup plus bas, avec 17 morts. Il est donc essentiel de construire des paravalanches adaptés à leur milieu pour assurer une sécurité et une efficacité de protection maximale.

## Les sites d'étude

Au Mont Dolin, au-dessus d'Arolla, le site d'étude se trouve dans une pente orientée aNE, entre 2800 et 2840 m. La déclivité moyenne est de 39° dans la pente d'éboulis, qui se trouve au pied d'une petite paroi. Ce flanc du Mont Dolin est composé de roches sédimentaires carbonatées du Trias – surtout des dolomies et des calcaires dolomitiques. Les éboulis ont une épaisseur moyenne de 2.7 m et la roche en place est sous-jacente. 5-10 % du volume des sédiments est constitué par de la glace (PHILLIPS 2000).

Dans le passé, les pentes du Mont Dolin constituaient un danger potentiel pour le village d'Arolla à leur pied. La pente était minée régulièrement par hélicoptère à la suite de chutes de neige (fig. 3) ce qui ne pouvait cependant être effectué que lorsque la visibilité le permettait. Depuis 1997, des paravalanches (filets à neige) ont été construits dans le secteur supérieur de la pente est du Mont Dolin, afin de réduire le risque de manière plus efficace (fig. 4).

Les filets à neige de Wisse Schijen ont été construits à la fin des années 1980 entre 3010 et 3140 m sur une



FIGURE 3 – Plaque de neige déclenchée par minage, Mont Dolin (1996). – PHOTO MARCIA PHILIPS



FIGURE 4 – Deux rangées de filets à neige, Mont Dolin (1997). – PHOTO MARCIA PHILIPS

pente de 39° orientée ENE pour protéger le village de Randa. Les roches prépondérantes sont des gneiss, des quartzites et des marbres. L'épaisseur moyenne des éboulis est de 2.5 m. Le contenu en glace n'a pas été mesuré, mais ne devrait pas dépasser les 10%, typiques des éboulis raides. En aval des filets à neige se trouvent plusieurs rangées de claies plus anciennes, dont une s'est déplacée de 1.5 m entre 1990 et 1995 et a donc dû être déplacée et reconstruite plus haut dans la pente (fig. 5).

## MÉTHODES

Les deux sites d'étude sont équipés de filets à neige (fig. 6). Plusieurs types d'ancrage ont été utilisés au Mont Dolin – micropieux, fiches d'ancrage, tubes en acier cintrés et plaques, tandis qu'à Wisse Schijen, principalement des micropieux combinés avec des tubes d'acier et des fiches d'ancrage (en amont des ouvrages) ont été mis en place. Des méthodes de construction spécialement adaptées ont été développées lors de la mise en place des ouvrages du Mont Dolin, en particulier concernant la mise en place du mortier dans les forages d'ancrages.

La position exacte des têtes d'ancrage est relevée annuellement au théodolite avec une précision de  $\pm 2$  mm

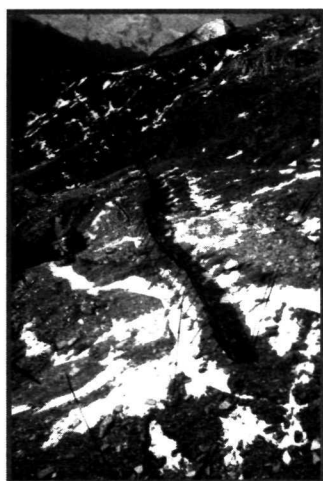


FIGURE 5 – Rangée de claus déformée par la reptation des éboulis gelés à Wisse Schijen.  
PHOTO S. MARGRETH, ENA.

afin de déterminer la stabilité des ancrages. Les points de référence fixes sont situés dans les parois rocheuses aux alentours. Cette méthode permet de comparer la stabilité des différents types d'ancrages et d'interpréter d'éventuels dégâts aux paravalanches lors de mouvements forts ou prolongés. Les têtes d'ancrage sont photographiées chaque été afin de déterminer si des dégâts ont eu lieu ou non. Chaque site dispose de forages de 4 à 6 m de profondeur dans lesquels des mesures de température

sont effectuées chaque heure avec une précision variant entre  $\pm 0.1$  et  $0.25^\circ\text{C}$ , selon les types de thermomètres utilisés. Les températures proches de la surface du terrain varient fortement en fonction de la distribution spatiale et temporelle de la neige, qui a un effet isolant à partir d'une épaisseur d'environ 40 cm. Les hauteurs de neige sont relevées régulièrement par un observateur au Mont Dolin. Wisse Schijen est malheureusement complètement inaccessible en hiver.

Les forages sont tous équipés de tubes inclinométriques et des mesures de déformation y sont effectuées chaque année dans ces forages avec un inclinomètre ayant une précision de  $\pm 0.15$  mm/m. Ces mesures permettent de déterminer à quelle profondeur se trouvent d'éventuels plans de glissement et d'observer la vitesse de déformation du terrain.

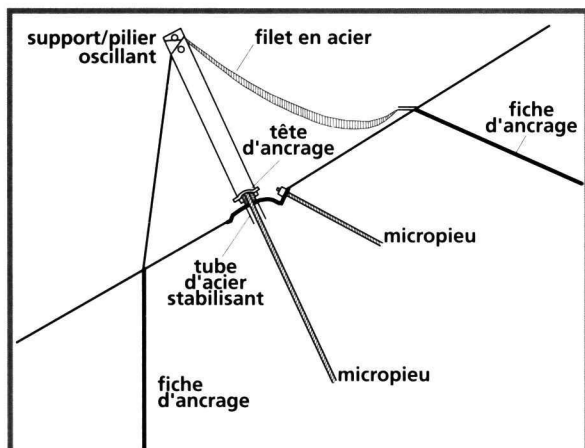
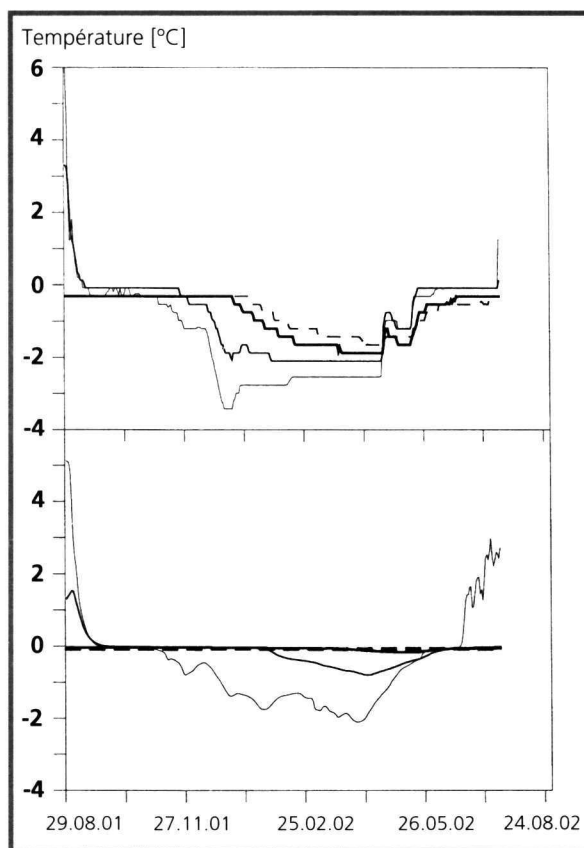


FIGURE 6 – Esquisse d'un filet à neige..

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Quelques données mesurées dans les forages les plus élevés de chaque site sont montrées ci-contre. Le forage supérieur à Arolla se trouve à 2865 m et celui de Wisse Schijen est à 3070 m. Des comparaisons des données sont difficiles, car les forages se trouvent à des altitudes différentes, les thermomètres utilisés sont de type différents et se trouvent à des profondeurs différentes. Il est néanmoins possible de faire quelques observations sur l'état du pergélisol sur les deux sites sur la base de ces données.

La **figure 7** montre des températures mesurées à plusieurs profondeurs dans les forages supérieurs du Mont



### Forage B1

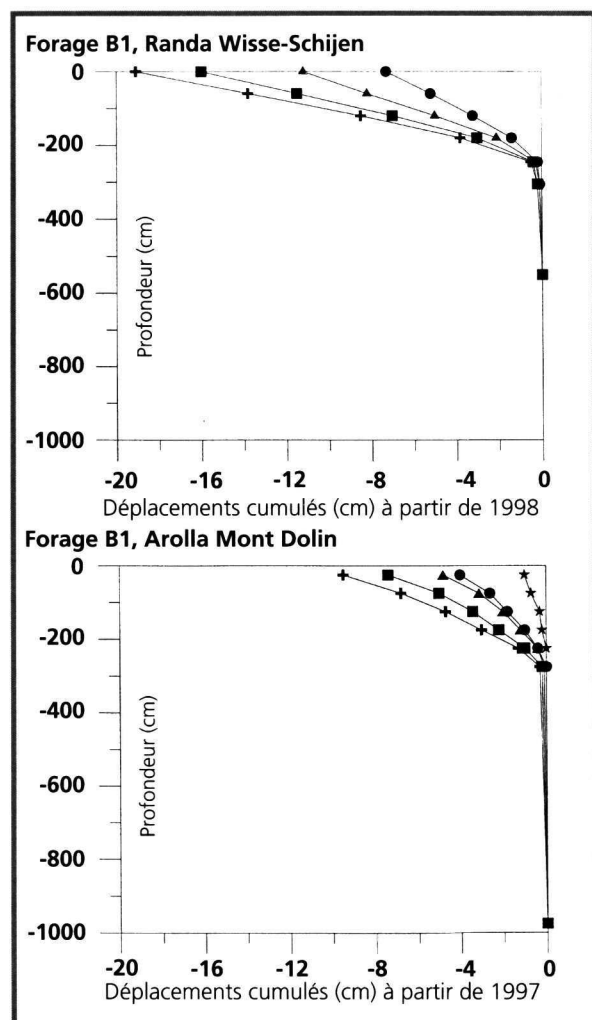
Wisse Schijen	Mont Dolin
0.3 m ———	0.5 m ———
0.8 m ———	1.5 m ———
1.8 m ———	2.5 m ———
2.8 m - - - - -	3.5 m - - - - -
	3.5 m - - - - -

FIGURE 7 – Températures du sol mesurées dans les forages supérieurs de Wisse Schijen (Randa) et du Mont Dolin (Arolla). (Seules les données de 2001-2002 sont montrées, car ces mesures ont été commencées à Wisse Schijen en 2001)

Dolin et de Wisse Schijen. Les données indiquent que le pergélisol est relativement «chaud», puisque la partie du sol qui reste gelée pendant toute l'année a une température juste au dessous de 0°C. L'état du pergélisol est assez précaire sur les deux sites, car un réchauffement de quelques dixièmes de degrés pourrait le faire disparaître. Les températures dans le forage de Wisse Schijen sont légèrement plus basses, probablement dû à son altitude plus élevée.

Les mesures de déformation des forages sont montrées dans la **figure 8**. La couche qui se déforme correspond à l'épaisseur des sédiments se trouvant sur la roche

en place, qui est stable. Au Mont Dolin les déformations varient d'année en année et semblent être dépendants de la profondeur de la neige en hiver, qui influence la quantité d'eau qui s'infiltre dans les éboulis au cours de l'été. A Wisse Schijen, les déformations sont beaucoup plus grandes mais aussi plus régulières. Ces observations sont aussi reflétées dans les mesures des positions des têtes d'ancrage des filets à neige (**tableau 1**). Les différences de stabilité entre les deux sites sont certainement dues à des différences de géologie (taille des sédiments, frottement interne, plans de glissement).



Wisse Schijen		Mont Dolin	
1999	●	1998	★
2000	▲	1999	●
2001	■	2000	▲
2002	+	2001	■
		2002	+

**FIGURE 8 – Mesures inclinométriques des déplacements cumulés dans les forages supérieurs de Wisse Schijen et du Mont Dolin.**



**FIGURE 9 – 30-40 cm d'érosion des éboulis sous un pilier oscillant de filet à neige (Wisse Schijen).**



**FIGURE 10 – 20 cm d'érosion autour d'une fiche d'ancrage (Wisse Schijen).**  
– PHOTOS MARCIA PHILIPS

Les mesures de déformation des forages et de déplacement des têtes d'ancrage indiquent qu'il est probable que seulement la partie supérieure des ancrages (celle qui se trouve dans les sédiments instables) se déforme et que la partie inférieure, qui est ancrée dans la roche en place demeure stable. Il n'est pas encore clair si ceci pourra engendrer des déformations aux filets ou des ruptures/extractions d'ancrage dans le futur. Le seul effet visible à présent est la dénudation progressive des têtes d'ancrage, dû à la reptation des sédiments (**fig. 9 et 10**).

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'état du pergélisol semble être précaire sur les deux sites d'étude. Vu que le contenu en glace est bas, la quantité d'énergie requise pour la faire fondre est beaucoup plus faible que dans un glacier rocheux par exemple. Une fonte du pergélisol dans les éboulis n'aurait néanmoins pas de conséquences graves pour la stabilité du terrain. Les déformations seraient probablement du même ordre de grandeur, typiques des sédiments inconsolidés sur des pentes très raides. Il est important de souligner que la température du pergélisol ne dépend pas uniquement de la température de l'air mais aussi de toute une série de facteurs, tels que l'épaisseur de la neige en hiver, la quantité d'eau infiltrée au cours de l'année et la rugosité des sédiments. Le phénomène est donc assez complexe et mérite d'être étudié à long terme.

Les filets à neige du Mont Dolin et de Wisse Schijen manifestent des degrés de reptation plutôt élevés, surtout après les hivers riches en neige. Les seuls dégâts visibles à présent sont la dénudation des fondations par



	WISSE SCHIJEN		MONT DOLIN	
Types et nombres d'ancrages	Fiches d'ancrage (amont) 31	Micropieux + tubes d'acier (sous supports) 20	Fiches d'ancrage (amont) 12	Micropieux + tubes d'acier (sous supports) 6
Moyenne annuelle (1999-2001)	4.9 cm	6.4 cm	1.7 cm	3.4 cm
Max. 1999-2000	9.3 cm	15.5 cm	6.5 cm	7.4 cm
Max. 2000-2001	9.9 cm	19.6 cm	3.2 cm	0.7 cm

TABEAU 1 – déplacement (vers l'aval) des têtes d'ancrage (fiches d'ancrage en amont des filets à neige) et micropieux (sous les supports des filets) entre 1999 et 2001 à Wisse Schijen et au Mont Dolin.

l'érosion des éboulis de surface. Les mesures de déformation des forages indiquent que toute la couche d'éboulis est instable dans ces pentes raides. Les têtes d'ancrage bougent en conséquence mais puisque la base des ancrages se trouve dans la roche en place, il semble qu'il y a une déformation de l'ancrage, sans conséquences graves. Les effets à long terme ne sont cependant pas connus.

Dans le cadre de ce projet de recherche, des nouvelles directives de construction ont été développées (ofefp/ena 2000). Selon celles-ci, il est indiqué d'installer des filets à neige (et non des claies) dans ce genre de terrain: leur géométrie peut facilement être corrigée à la fin de l'hiver en cas de mouvements du terrain ou de chutes de pierres. Les directives déconseillent la construction de paravalanches si les mouvements de reptation du sol dépassent 5 cm par an. Ces valeurs sont clairement dépassées sur les deux sites étudiés, mais grâce à l'homogénéité des déplacements, aucun dégât n'a été observé jusqu'à présent.

Les paravalanches ne peuvent pas stabiliser une pente raide et instable. Il apparaît néanmoins qu'ils contribuent à refroidir le sol, car ils modifient la distribution spatiale et temporelle de la couverture neigeuse. La fonte de la neige est retardée de plusieurs semaines là où il y a des paravalanches, et ceci contribue à un refroidissement du sol à long terme (Phillips 2000). Ceci a un aspect positif, car plus la glace contenue dans les sédiments gelés est froide, plus elle est stable.

## BIBLIOGRAPHIE

- BROCCARD, A. 1998. Coupes dans des matériaux gelés au Gröbdtäli, Vallée de Tourtemagne, VS: un pergélisol en voie de disparition? *Bull. Murithienne* 116, pp. 91-98.
- CRITTIN, C. 1999. *Cartographie géomorphologique dans des périmètres de construction de paravalanches*. Mémoire de licence non-publié, Institut de Géographie, Université de Lausanne.
- MARGRETH S., HARVEY S., WILHELM C. 2000. *Effectiveness of long term avalanche defence measures in winter 1999 in Switzerland*. Proceedings of the International Snow Science Workshop, October 1st-6th 2000, Big Sky, Montana: 501-508.
- OFEFP/ENA 1990/2000. *Directives pour la construction de paravalanches dans la zone de décrochement*. Berne, OFCIM.
- PHILLIPS M. 2000. *Influences of snow-supporting structures on the thermal regime of the ground in alpine permafrost terrain*. Davos, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung.
- STOFFEL L. 1995. Bautechnische Grundlagen für das Erstellen von Lawinenverbauungen im alpinen Permafrost. *Mitteilungen des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung*. Nr. 52. Davos.
- THALPARPAN P. 2000. Lawinenverbauungen im Permafrost. Davos, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung.

## REMERCIEMENTS

Ce projet a été financé par les cantons du Valais et des Grisons ainsi que par l'OFEFP. Mes remerciements sincères vont à Charly Wuilloud, Patrik Thalparpan, Walter Ammann, Reto Wetter, Martin Hiller, Alain Broccard, François Dufour, Basile Bournissen, Monica Anzevui et Vincent Anzevui – sans lesquels la réalisation de ce projet de recherche n'aurait pas été possible. Les mesures ont été effectuées en collaboration avec les Bureaux Pascal Tissières, Antoine Rieder, Hermann Rovina et Klaus Aufdenblatten. Emmanuel Reynard est chaleureusement remercié d'avoir soigneusement lu et corrigé le français dans cet article.

